

РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО КОММУТАТОРА ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

© И. В. Князев, М. С. Палагин, Э. Г. Косцов, А. В. Глухов

АО «НЗПП с ОКБ», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

Описывается конструкция нового быстродействующего элемента перестраиваемой полевом дифракционной решётки (GLV). Рассмотрены основы проектирования, приведены результаты расчётов и моделирования GLV-элемента. Показана возможность создания быстродействующего коммутатора оптических сигналов с частотой модуляции до 10 МГц.

Ключевые слова: МОЭМС, дифракционная решётка, GLV, коммутатор оптических сигналов

Сведения об авторах: Князев Иван Викторович, kiv@nzpp.ru; Палагин Максим Сергеевич, m.palagin@gmail.ru; Косцов Эдуард Геннадьевич, д.ф.-м.н., kostsov@iae.nsk.su; Глухов Александр Викторович, к.т.н., glw@mail.ru

DESIGN OF FAST OPTICAL SWITCH WITH DYNAMICALLY TUNABLE WAVELENGTH

I. V. Knyazev, M. S. Palagin, E. G. Kostsov, A. V. Gluhov

JSC «Novosibirsk Factory of Semiconductor Devices with Special Design Centre»,
630082, Novosibirsk, Dachnaya street, 60

Structure of novel fast-speed element of field tunable grating-light-valve is described. Basic design and simulation results of GLV-element are presented. Fabrication of fast optical switch with modulation frequency up to 10 MHz is shown.

Keywords: MOEMC, grating light valve, GLV, optical switch

Data of authors: Knyazev Ivan Viktorovich, kiv@nzpp.ru; Palagin Maxim Sergeevich, m.palagin@gmail.ru; Kostsov Eduard Gennadevich, Sc.D., kostsov@iae.nsk.su; Gluhov Alexandr Viktorovich, Ph.D., glw@mail.ru

Введение

В последние годы в связи с экспоненциальным ростом информационных потоков увеличивается необходимость значительного повышения скорости передачи данных до 10 Гб/с и более. Обеспечение таких высоких скоростей возможно только при замене современных электронных систем с двойным преобразованием сигнала (из оптического в электронный и обратно) – опти-

ческими. К устройствам, использующимся в области телекоммуникаций, предъявляется ряд требований. В первую очередь – это высокое быстродействие (коммутация должна осуществляться за десятки наносекунд и менее), большое число коммутируемых каналов (более 10^2), высокий коэффициент ослабления сигнала (15-40 дБ), малые вносимые потери, минимальное взаимное влияние коммутируемых каналов и др.

Перестраиваемая электрическим полем дифракционная решётка (GLV)

Анализ характеристик современных устройств, способных модулировать оптические сигналы, показывает, что наиболее эффективными с точки зрения быстродействия и технологичности являются коммутаторы на основе микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) [1]. Среди них можно выделить активно развивающиеся в последние годы GLV-устройства (Grating Light Valve – перестраиваемая электрическим полем дифракционная решётка). Устройство представляет собой линейку микробалок (1 000 и более), расположенных параллельно друг другу. При подаче управляющего напряжения микробалки прогибаются под действием электростатического поля. Типичные геометрические размеры микробалок: длина $l = 50-200$ мкм, ширина $w = 2-6$ мкм, толщина $t = 1-2$ мкм; расстояние между микробалками $0,5-1,5$ мкм. Материалом при изготовлении микробалки может служить поликремний, либо металлы (сплавы металлов): бронза, серебро и др. На рис. 1 приведены фрагмент топологии GLV-устройства и фотографии тестовой структуры линейки микробалок, изготовленных на АО «НЗПП с ОКБ» (г. Новосибирск).

Конструкция базового элемента GLV представлена на рис. 2. Основой элемента

является стандартная кремниевая пластина, на поверхности которой формируется электрод одним из способов: путём ионного легирования или с помощью напыления проводящего материала (Pt, ITO). На поверхность электрода наносится плёнка сегнетоэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью порядка 1000-3000 (например, NBS – ниобат бария-стронция) и толщиной $0,5-2,5$ мкм для более эффективного использования электрического поля в воздушном зазоре величиной порядка $0,4-1,0$ мкм [1]. На следующем этапе формируется жертвенный слой, толщина которого задаёт необходимую величину воздушного зазора (зависит от рабочей длины волны). После этого происходит нанесение слоя для формирования микробалок (поликремний, бронза) и напыление тонкого покрытия с высокой отражающей способностью до 99 % и выше (Al, Au, Ag, Pt, Cu) [2, 3].

Устройство работает следующим образом. Когда управляющее напряжение не прикладывается, свет отражается от «гладкой» поверхности совокупности микробалок как от плоского зеркала.

Если в определённой последовательности на микробалки подаётся управляющее напряжение они прогибаются и создают рельефную поверхность, в результате чего

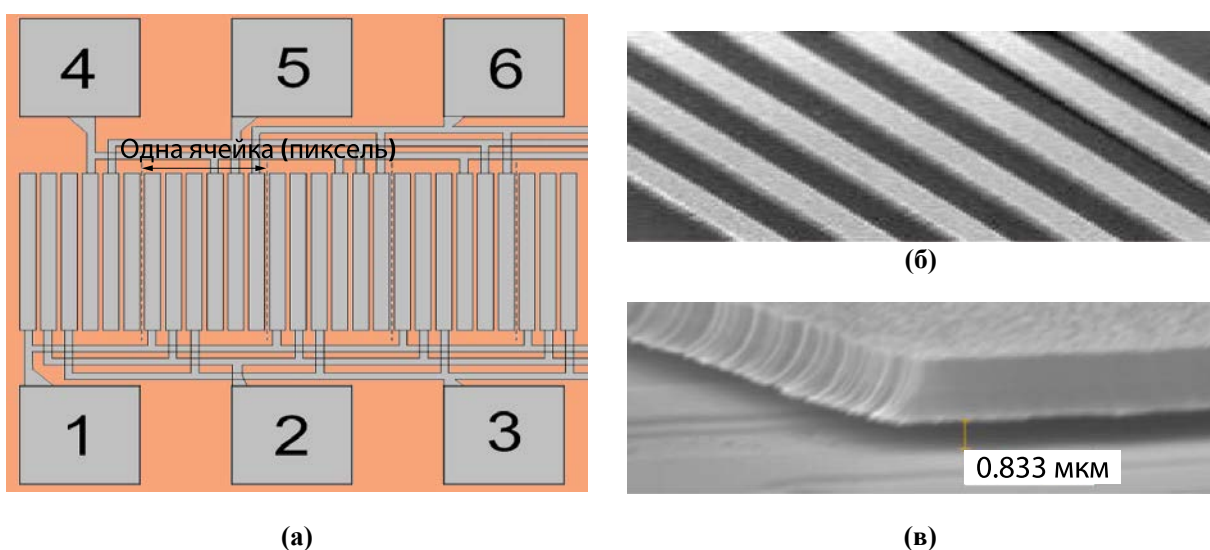


Рис. 1

Фрагмент топологии GLV-устройства (а); РЭМ-фотография линейки микробалок (б); воздушный зазор, полученный в результате травления жертвенного слоя толщиной около $0,85$ мкм (в)

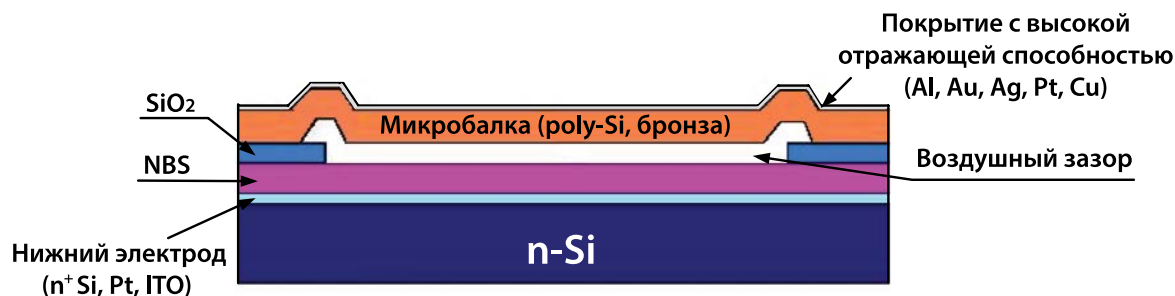


Рис. 2

Конструкция базового элемента GLV

происходит дифракция падающего излучения. Угол дифракции θ определяется соотношением [4]:

$$\sin\theta = m \cdot \lambda / p, \quad (1)$$

где m – порядок дифракции, λ – длина волны падающего излучения, p – период решётки.

Если максимум дифрагированного света распределяется между ± 1 порядками, при их суммировании, без учёта рассеивания на боковых стенках микробалок, можно получить дифракционную эффективность (отношение интенсивностей дифрагированного излучения к падающему) до 80 % и более. При этом величина прогиба микробалок должна быть равна $\lambda/4$. В та-

ком случае на выходе оптической системы будет формироваться светлая область.

На рис. 3 приведена зависимость дифракционной эффективности от прогиба микробалки и соответствующее распределение дифрагированного света между основными порядками дифракции для решётки с параметрами: период решётки 2 мкм, угол падающего излучения 13,5°, длина волны $\lambda = 550$ нм [4].

Моделирование GLV-устройства

Параметры базового элемента GLV-микробалки – определяют основные динамические и оптические характеристики устройства. Поэтому важной задачей при проектировании GLV является точное определение механических и электрофизических свойств микробалок.

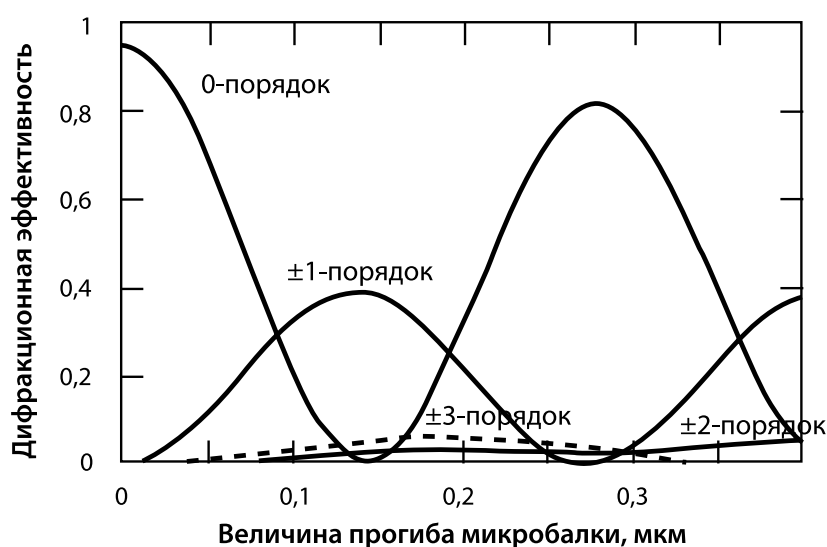


Рис. 3

Зависимость дифракционной эффективности от величины прогиба микробалки для решётки с параметрами: период 2 мкм, угол падающего излучения 13,5°, длина волны $\lambda = 550$ нм

Из конструкции, приведённой на рис. 2, следует, что для расчёта основной собственной частоты колебаний микробалки необходимо использовать модель, учитывающую жёсткое двухстороннее закрепление [5]:

$$f = \frac{4,73^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{Et^3 S}{12M}} \sqrt{1 + 0,2949 \cdot \frac{l^2}{t^2} \sigma}, \quad (2)$$

где l , t , S и M – длина, толщина, площадь и масса микробалки соответственно, E – модуль юнга, σ – механические деформации в плёнке при отсутствии нагрузки.

Поскольку прижатие микробалки осуществляется за счёт действия электростатических сил, уравнение для определения прогиба микробалки под действием распределённой силы будет иметь следующий вид [6]:

$$Y(y) = \frac{\varepsilon_0 V^2 (y^2 - (l/2)^2)^2}{4Et^3 (d+h/\varepsilon - \delta)^2}, \quad (3)$$

где y – расстояние от центра микробалки до концов её заземления, V – величина управляющего напряжения, необходимая для достижения прогиба микробалки (δ), d – протяженность исходного воздушного зазора, h и ε – тол-

щина и диэлектрическая проницаемость плёнки сегнетоэлектрика, соответственно.

Величина управляющего напряжения может быть найдена согласно [7]:

$$V = 2\pi f (d+h/\varepsilon) \sqrt{\left(1 - \frac{\delta}{2(d+h/\varepsilon)}\right) \frac{M\delta}{2\varepsilon_0 S}}. \quad (4)$$

Форма прогиба микробалки с параметрами: $l=50$ мкм, $w=5$ мкм, $t=2,5$ мкм, при величине воздушного зазора $d=0,47$ мкм и параметрах сегнетоэлектрика: $h=1$ мкм и $\varepsilon=1000$, величине прогиба $\delta=160$ нм (при $\lambda=640$ нм – красный цвет) и частоте колебаний $f=10$ МГц при воздействии положительного импульса управляющего напряжения приведена на рис. 4.

Важным преимуществом GLV-устройства по сравнению с другими известными оптическими аналогами является возможность функционирования на разных длинах волн в достаточно широком спектральном диапазоне. На рис. 5 приведена зависимость прогиба микробалки от величины управляющего напряжения для видимого диапазона длин волн и близкой области инфракрасного спектра. Параметры микробалки при моделировании: $l=50$ мкм, $w=5$ мкм, $t=1$ мкм, величина воздушного зазора $d=0,53$ мкм, частота модуляции $f=3,7$ МГц.

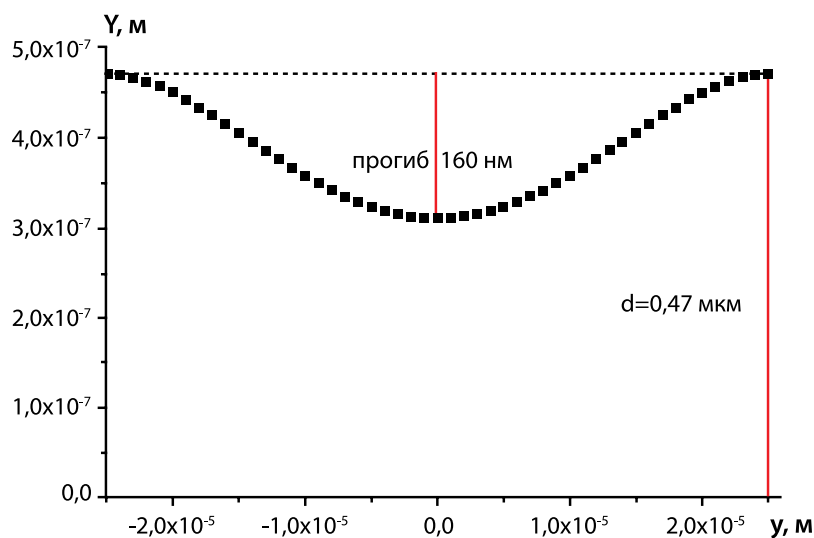


Рис. 4

Форма прогиба микробалки под действием положительного импульса управляющего напряжения

Поскольку типичные размеры микробалок определяют отношение l/w равным 10 и более, влиянием демпфирования во время движения можно пренебречь. Однако малый коэффициент демпфирования приводит к появлению отрицательного эффекта «дребезга», что в значительной степени влияет на коэффициент передачи сигнала. Для получения оптимального отклика микробалки на импульс напряжения необходимо, чтобы величина относительного демпфирования находилась в диапазоне 0,52-0,65 [8]. Анализ показывает, что для данного вида устройств эта величина в воздушной среде при нормальном давлении и температуре не превышает 0,12 (на частоте выше 3,7 МГц). Поэтому для обеспечения оптимальной величины демпфирования необходимо заполнить рабочий объём GLV-устройства газами, например, ксеноном или различными смесями газов [9] при повышенном давлении.

Заключение

Сильная зависимость амплитуды прогиба микробалки, который определяется длиной волны коммутируемого излучения, от управляющего напряжения, а также от частоты модуляции сигнала, ограничивает применение GLV-устройства в области те-

лекоммуникаций, поскольку для этого требуются относительно большие управляющие напряжения. Однако устройства на основе GLV уже нашли широкое применение при создании высококачественных цифровых дисплеев, NIR устройств тепловой печати и современных установок для процесса ультрафиолетовой литографии [10]. Дальнейшее развитие указанной технологии позволит осуществить переход к построению телекоммуникационных сетей со скоростями передачи данных до 150 Гб/с. Основной задачей при достижении таких скоростей является снижение рабочего напряжения и увеличение прогиба микробалки для функционирования в диапазоне длин волн 1290-1610 нм.

Литература

1. Косцов Э. Г., Князев И. В. Микроэлектромеханические дифракционные решётки: области применения и перспективы развития // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 71-88.
2. Megens M., Yoo B. W., Chan T., Yang W., Sun T., Chang-Hasnain C. J., Wu M. C., and Horsley D. A. High-speed 32×32 MEMS optical phased array // Proc. of SPIE, 2014, vol. 8977, 7 p.
3. Белкин А. М., Косцов Э. Г., Соболев В. С. Численное моделирование дифракционной эффективности

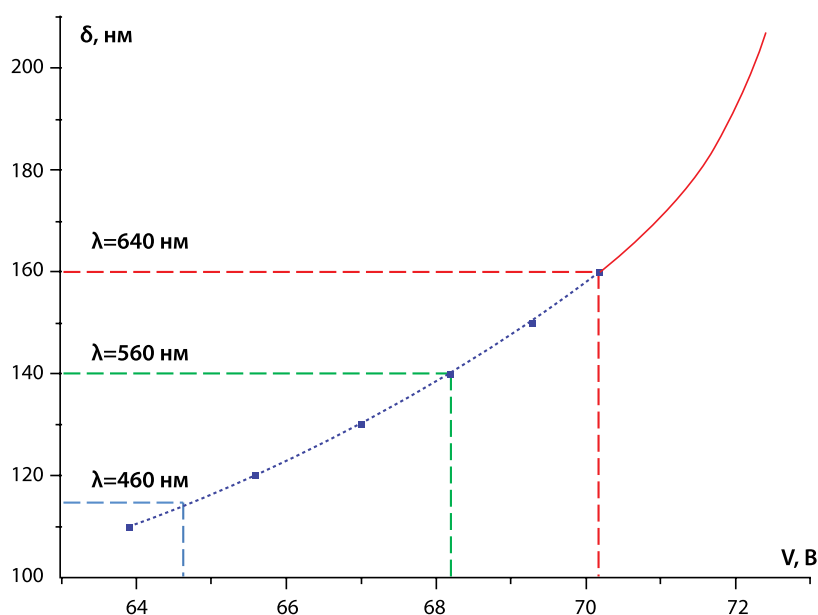


Рис. 5
Зависимость прогиба микробалки от амплитуды импульса управляющего напряжения с частотой модуляции 3,7 МГц

- ступенчатых МЭМС решёток // Доклады IV Всероссийской конференции «Фундаментальные основы МЭМС и нанотехнологий», г. Новосибирск, 6-8 июня 2012. – № 4. – С. 75-80.
4. Apte R. Grating light valves for high resolution displays: dissertation of doctor of philosophy // Stanford University Press, 1994, 91 p.
 5. Hähnlein B., Tonisch K., Eckel G., Grieseler R., Michael S., Schaaf P., and Pezoldt J. AlGaN based MEMS structures // Phys. Status Solidi, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 239-243.
 6. Choi B., Lovell E. G. Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads // Micromech. Microeng., 1997, 7, pp. 24-29.
 7. Kostsov E. G., Fadeev S. I. New microelectromechanical cavities for gigahertz frequencies // Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 115-122.
 8. Kempe V. Inertial MEMS: principles and practice // Cambridge University Press, 2011, 497 p.
 9. Payne A., DeGroot W., Monteverde R., Amm D. Enabling high data rate imaging applications with Grating Light Valve™ technology // Proc. SPIE, 2004, vol. 5348, pp. 76-88.
 10. Режим доступа: <http://www.siliconlight.com> (дата обращения: 29.04.2016).
- ### References
1. Kostsov E. G., Knyazev I. V. Microelectromechanical grating light valves: applications and future development. *Avtometriya* [Avtometriya], 2013, vol. 49, № 3, pp. 71-88.
 2. Megens M., Yoo B. W., Chan T., Yang W., Sun T., Chang-Hasnain C. J., Wu M. C., and Horsley D. A. High-speed 32×32 MEMS optical phased array // Proc. of SPIE, 2014, vol. 8977, 7 p.
 3. Belkin A. M., Kostsov E. G., Sobolev V. S. *Doklady IV Vserossiyskoy konferentsii «Fundamentalnye osnovy MEMS i nanotekhnologiy»* [Proceedings of IV All-Russian Conference: Fundamental basics of MEMS and nano-technology]. Novosibirsk, 6-8 June 2012, № 4, pp. 75-80.
 4. Apte R. Grating light valves for high resolution displays: dissertation of doctor of philosophy // Stanford University Press, 1994, 91 p.
 5. Hähnlein B., Tonisch K., Eckel G., Grieseler R., Michael S., Schaaf P., and Pezoldt J. AlGaN based MEMS structures // Phys. Status Solidi, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 239-243.
 6. Choi B., Lovell E. G. Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads // Micromech. Microeng., 1997, 7, pp. 24-29.
 7. Kostsov E. G., Fadeev S. I. New microelectromechanical cavities for gigahertz frequencies // Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 115-122.
 8. Kempe V. Inertial MEMS: principles and practice // Cambridge University Press, 2011, 497 p.
 9. Payne A., DeGroot W., Monteverde R., Amm D. Enabling high data rate imaging applications with Grating Light Valve™ technology // Proc. SPIE, 2004, vol. 5348, pp. 76-88.
 10. URL: <http://www.siliconlight.com> (accessed 29 April 2016).